

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТКАНЕЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ПЛАСТИКОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В 3D ПЕЧАТИ, ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФАНТОМОВ

*Беляев Д.В., Гасилова Е.К., Вазиров Р.А.*

ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
Екатеринбург, Россия

Danil.Beliaev@urfu.me, [Ekaterina.Gasilova@urfu.me](mailto:Ekaterina.Gasilova@urfu.me), ruslan.vazirov@urfu.ru

## **Аннотация.**

Развитие технологии 3D-печати стимулирует активный поиск новых способов ее применения. Создание фантомов с помощью 3D-принтера – одно из перспективных направлений. Такой подход позволит проводить более точный и индивидуальный дозиметрический контроль перед прохождением курса лучевой терапии. Основная цель этого исследования - изучить тканеэквивалентность пластиков, применяемых в 3D печати. Массовый коэффициент ослабления фотонного излучения был определен на основе химического состава путем расчета в базе данных XCom, которая представлена и поддерживается национальным институтом стандартов и технологий (NIST). Затем был осуществлен расчет линейных коэффициентов ослабления. Сравнение линейных коэффициентов ослабления проводилось с 4 тканями человека (печень, кожа, почки и грудь). Численные значения ослабления фотонного излучения тканями были получены из отчета №44 Международной комиссии по радиационным единицам и измерениям (report №44 ICRU). Среднее отношение пластик / ткань было рассчитано для выбранного диапазона энергий (10–150 кэВ). На основании экспериментальных данных получено, что наиболее тканеэквивалентным пластиком из рассмотренных является PETG. Наилучшее соответствие наблюдается с почкой и кожей. Это исследование показывает, что существующие материалы, используемые в 3D-печати, можно использовать для создания индивидуальных фантомов.

**Ключевые слова:** тканеэквивалентность, лучевая терапия, фантомы, 3D печать, аддитивные технологии, клиническая дозиметрия

## **EVALUATION OF 3D PRINTING MATERIALS AS TISSUE EQUIVALENT MATERIALS FOR PHANTOM MANUFACTURING**

*Belyaev D., Gasilova E., Vazirov R.*

### **Abstract.**

The development of 3D printing technology stimulates an active search for new methods of its application. Creating phantoms using a 3D printer is one of the promising areas. This will allow for more accurate and individual dosimetric monitoring during radiation therapy. The purpose of this work is to study the tissue equivalence of plastics used in 3D printing. The mass attenuation coefficient was determined based on chemical composition by calculation in the XCom database, which is presented and maintained by the National Institute of Standards and Technology (NIST). Then the linear attenuation factors were calculated. Linear attenuation coefficients were compared with 4 human tissues (liver, skin, kidney, and breast). Tissue attenuation values for photon radiation were obtained from International Commission on Radiation Units and Measurements report №44 (ICRU report №44). The average plastic / tissue ratio was calculated for the selected energy range (10–150 keV). Based on experimental data, it was found that PETG plastic is the best for imitating kidney and skin. This study shows that existing materials used in 3D printing can be used to create customized phantoms.

**Key words:** tissue equivalence, radiation therapy, phantoms, 3D printing, additive technologies, clinical dosimetry

### **Введение.**

Специалисты часто используют дозиметрические фантомы для моделирования процесса облучения перед проведением курса лучевой терапии [1]. Все фантомы действуют как модель и используются для эмпирической проверки курса, смоделированного в системе планирования лучевой терапии.

Вода является наиболее распространенным материалом, используемым в качестве фантома в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ. Однако водные фантомы имеют крайне примитивную форму и чаще всего выполняются в виде куба или параллелепипеда, который заполняется жидкостью. Парафиновые фантомы – одна из возможных замен водных фантомов. Парафиновым фантомам часто придают форму и размер, близкие к форме и размеру облучаемой части тела человека [1]. Парафиновый фантом позволяет лучше воспроизвести взаимное расположение пациента и источника излучения, но не отражает

неоднородную структуру человеческого тела. Универсальные антропометрические фантомы, используемые для клинической дозиметрии, позволяют отразить гетерогенность человеческого тела, но они представляют человека стандартного телосложения [2]. Такие фантомы часто ограничены в рассмотрении патологических характеристик пациентов, что может привести к серьезным ошибкам при планировании диагностики или лечения. Основная цель исследования – оценить возможность использования пластика, используемого в 3D-печати, для изготовления индивидуальных фантомов, которые могут быть использованы для лучевой терапии и клинической дозиметрии.

### **Материалы и методы.**

Коэффициенты массового ослабления для тканей и пластика определялись на основании химического состава в программе XCOM [3] в диапазоне энергий 10 – 150 кэВ, который характерен для диагностических установок и применяется в близкофокусной терапии.

В качестве тестового пластика был выбран коммерчески доступный и широко распространенный пластик PLA. Также были рассчитаны массовые коэффициенты ослабления для пластиков PETG и ABS, химический состав которых был получен в исследовании [4].

Химический состав пластиков определялся методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (SEM – EDS), реализуемой в сканирующем электронном микроскопе. Химический состав органов взят из отчета МКРЕ № 44 [5]. Интересующие ткани – это печень, кожа, почки и молочная железа.

Линейный коэффициент ослабления определялся путем произведения массового коэффициента ослабления на плотность пластика (ткани). Для пластиков использовалась плотность, указанная изготовителем. Плотности тканей человека были взяты из отчета МКРЕ №44 [5]. Далее были вычислены средние значения отношений линейного коэффициента ослабления органа к пластику для каждой энергии и стандартные отклонения. Построение зависимостей линейных коэффициентов ослабления выполнены в Microsoft Excel.

### **Результаты и обсуждение.**

В таблице 1 представлен химический состав органов и пластиков. Наблюдается существенная качественная и количественная разница в химическом составе органов и пластика. Однако можно сделать вывод, что наибольшее (более 80%) массовое содержание составляют два элемента: углерод

и кислород. Отсутствие H, N и P наблюдается во всех пластиках, в отличие от органов. В то же время в пластике PLA присутствуют Fe, Cu, Zn, Sr и Ba, которых нет в органах. Также отметим, что в пластике преобладающим элементом является углерод, а в органах - кислород.

Таблица 1 – Химический состав органов и пластмасс (в процентах по массе)

Химический элемент	Печень	Почка	Кожа	Молочная железа	PLA	ABS	PETG
H	10.20	10.30	10.00	10.60	-	-	-
C	13.90	13.20	20.40	33.20	46.32	92.44	70.45
N	3.00	3.00	4.20	3.00	-	-	-
O	71.60	72.40	64.50	52.70	38.08	5.68	29.33
Na	0.20	0.20	0.20	0.10	-	1.79	0.07
Mg	-	-	-	-	-	-	-
Si	-	-	-	-	1.80	-	-
P	0.30	0.20	0.10	0.10	-	-	-
S	0.30	0.20	0.20	0.20	0.4	0.09	0.15
Cl	0.20	0.20	0.30	0.10	2.5	-	-
K	0.30	0.20	0.10	-	0.40	-	-
Ca	-	0.10	-	-	3.40	-	-
Fe	-	-	-	-	0.80	-	-
Cu	-	-	-	-	0.70	-	-
Zn	-	-	-	-	0.60	-	-
Sr	-	-	-	-	0.20	-	-
Ba	-	-	-	-	4.60	-	-

Результат расчетов среднего значения отношения линейного коэффициента ослабления человеческого органа к пластикам представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Среднее значение отношения человеческий орган к пластикам

	Печень	Молочная железа	Почка	Кожа
ABS	$1,38 \pm 0,30$	$1,20 \pm 0,15$	$1,36 \pm 0,29$	$1,36 \pm 0,25$
PETG	$1,05 \pm 0,14$	$0,92 \pm 0,04$	$1,04 \pm 0,14$	$1,04 \pm 0,10$
PLA	$0,32 \pm 0,19$	$0,29 \pm 0,19$	$0,32 \pm 0,19$	$0,32 \pm 0,20$

PETG показывает наилучшее сходство по линейному коэффициенту ослабления в выбранном диапазоне энергий.

Пластмассы ABS и PLA показывают менее удовлетворительные результаты. PLA имеет значительно больший коэффициент ослабления. Малое значение отношения коэффициентов ослабления тканей к PLA не позволяет использовать его для дозиметрии в качестве тканеэквивалентного материала.

На основании Таблицы 2 были построены графики зависимости линейных коэффициентов от энергии для пластиков, показавших наилучшее соответствие с выбранными органами. Полученные зависимости приведены на рисунках 1 и 2.

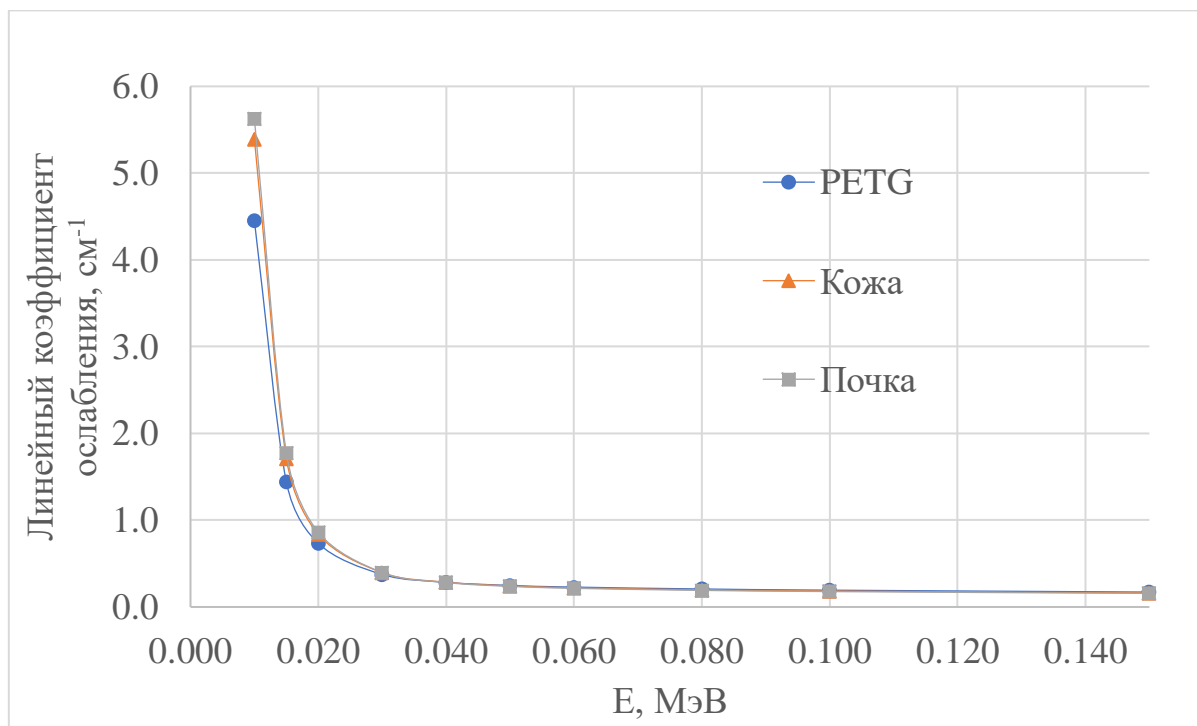


Рисунок 1 – Зависимость линейного коэффициента ослабления для PETG, кожи и почки

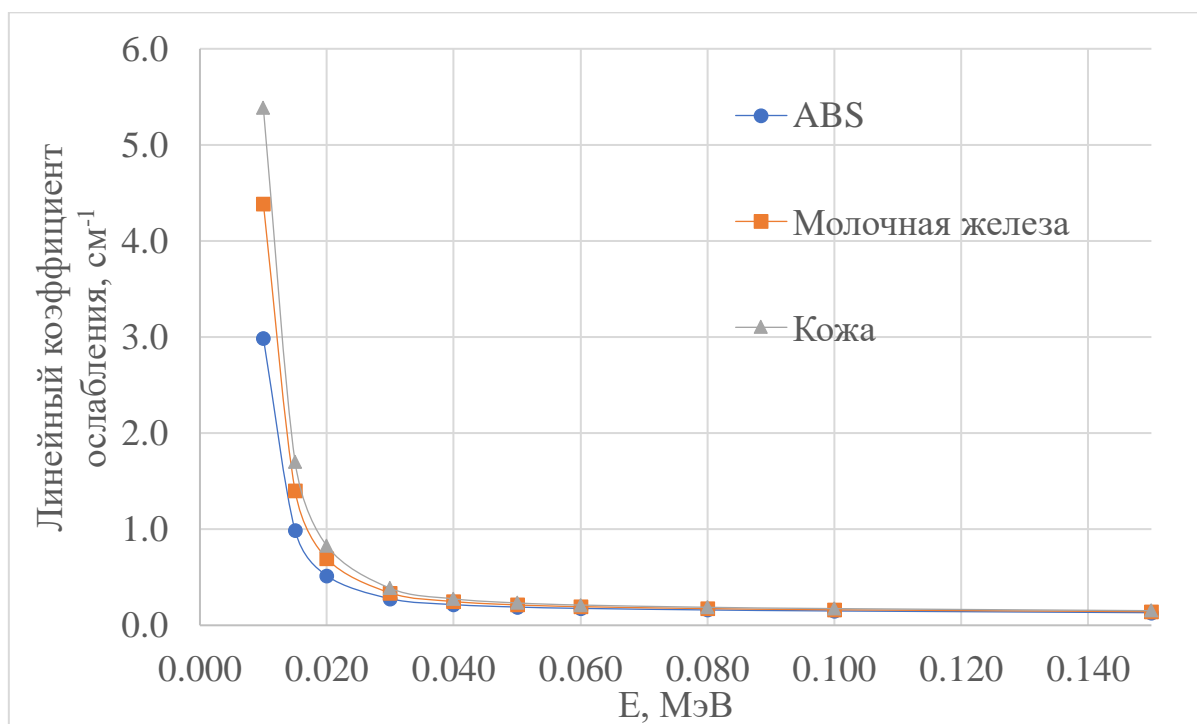


Рисунок 2 – Зависимость линейного коэффициента ослабления для ABS, молочной железы и кожи

По полученным графикам видно, что наибольшее различия наблюдается в области малых энергий до 40 кэВ. С ростом энергии различия становятся менее значительны. Для подтверждения возможности использования данных пластиков в качестве тканеэквивалентного материала требуется проведения прямого измерения линейных коэффициентов ослабления с использованием источников ионизирующих излучений, применяющихся в лучевой терапии.

### **Заключение**

По результатам исследования наиболее тканеэквивалентным материалом является PETG пластик. Возможность использования его в качестве фантомов выбранных тканей предстоит установить путем прямых измерений массового коэффициента ослабления с помощью медицинской ускорительной техники.

3D печать – перспективный метод для изготовления дозиметрических фантомов. Такой подход позволит создавать полностью персонализированные изделия, что повысит качество планирования лучевой терапии.

Еще одним преимуществом такого подхода является невысокая стоимость изготовления фантомов за счет использования широкодоступных материалов.

Сейчас 3D-печать имеет широкий выбор материалов, который постоянно обновляется, поэтому можно будет выбрать наиболее подходящий материал для имитации различных органов и тканей.

Все эти преимущества позволяют рассматривать 3D-печать как один из основных методов будущего изготовления индивидуальных фантомов.

### **Библиографический список**

1. Богдан И. В. и др. Голографическое моделирование эффекта лазерной биостимуляции и методы изготовления фантомных тест-объектов для радиологии // Компьютерная оптика. – 2004. – №. 26.
2. Tino R. et al. A systematic review on 3D-printed imaging and dosimetry phantoms in radiation therapy // Technology in cancer research & treatment. – 2019. – Т. 18. – С. 1533033819870208.
3. Berger M J and Hubbell JH (1999). XCOM: Photon Cross Sections Database. Web Version 1.2. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899, USA. Originally published as NBSIR 87-3597 "XCOM: Photon Cross Sections on a Personal Computer.
4. Alssabbagh M. et al. Evaluation of nine 3D printing materials as tissue equivalent materials in terms of mass attenuation coefficient and mass density //

INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED AND APPLIED SCIENCES. – 2017. – T. 4. – №. 9. – C. 168-173.

5. ICRU (1989). Tissue substitutes in radiation dosimetry and measurement. Report 44, International Commission on Radiation Units and Measurements, Maryland, USA